



科学家谈物理学重要方向

宽禁带半导体物理[☆]

申德振

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033

E-mail: shendz@ciomp.ac.cn

DOI: 10.15978/j.cnki.1673-5668.202105006

宽禁带半导体材料包括氮化镓 (GaN)、碳化硅 (SiC)、氧化锌 (ZnO)、氧化镓 (Ga_2O_3) 和金刚石等, 也被称为第3代半导体材料。与硅 (Si)、锗 (Ge)、砷化镓 (GaAs) 等前两代传统半导体材料相比, 宽禁带半导体材料除具有优异的光电特性外, 还具有击穿电场高、热导率高、电子饱和速率高、抗辐射能力强、介电常数低等优越性能, 因此宽禁带半导体材料被广泛用于制作电子电力和光电器件, 其不仅能在更高的温度下稳定运行, 而且在高电压、高频率状态下更为耐用和可靠, 此外还能以较少的电能消耗获得空前的运行能力。宽禁带半导体材料和器件在能源、交通、信息、先进制造、国防等领域有着诸多应用, 因而能有效带动各领域的技术进步和产业发展。

因宽禁带半导体材料具有上述优越性能, 因此在短波发光/激光、探测等光电子器件和高温、高压、高频大功率的电子电力器件领域有广阔的应用前景。具体表现, 也即近10年的热点研究问题如下。

光电子器件

(1) 短波发光/激光器件GaN基蓝光发光二极管的发明引起了人类照明光源的又一次革命, 日本科学家赤崎勇 (I. Akasaki)、天野浩 (H. Amano) 和美籍日裔科

学家中村修二 (S. Nakamura) 也因该工作获得了2014年诺贝尔物理学奖。同时, GaN基蓝光激光器二极管在高密度信息存储、激光显示、光通信、生物医学等民用和军用领域都有重要而广泛的应用, 是光电子产业的龙头产品。因此, 近年来高Al组分的GaAlN的P型掺杂、高质量GaN基薄膜的外延生长、Si衬底外延技术等是各国科研人员研究开发的重点和热点, 目的是获得更高效、更廉价的半导体发光和激光器件, 同时进一步将发光和激光波长向深紫外波段扩展, 满足信息、能源、交通等领域的高新技术产业发展和国家的国防安全需求。

除GaN基材料外, ZnO被认为是发展短波长光电子器件的优选材料, 其激子束缚能高达60 MeV, 有望用来发展激子型激光器, 应用前景和经济价值巨大。但ZnO基材料及其发光/激光器件的研究起步较晚, 并且同样面临着20世纪90年代GaN发展过程中经历的P型掺杂的难题, 因此近年来如何实现高质量、稳定可重复的P型ZnO材料一直是该领域国际研究的热点。此外, 通过Mg的掺入可使ZnO的带隙从3.4 eV到7.8 eV连续可调, 因此为了实现发光/激光波长向深紫外波段扩展, 高质量的ZnMgO三元合金的制备也是各国科研人员努力解决的一个重要问题。

[☆]本文源自国家自然科学基金委员会政策局2018年6月完成的《学科发展态势评估系列研究报告》之《物理学十年: 中国与世界》。



(2) 紫外探测器件宽禁带半导体紫外探测器具有抗辐射性能强、本征可见/太阳盲、稳定性高、工作电压低、全固态等诸多优点,被认为有望取代真空光电倍增管和硅基光电管而成为新一代紫外探测器件。GaN和SiC基材料工艺成熟,其紫外探测器已经商品化,并得到了广泛的应用。SiC材料优异的热学特性和抗辐照特性,使其成为制备紫外光电探测器的首选材料之一,尤其是针对高温、强辐射、宇宙空间等特殊环境的应用。而GaN基材料可通过Al的掺入实现更宽的探测范围,是制备日盲紫外探测器的理想材料之一。近年来,如何实现高灵敏度、高效率的深紫外探测器是各国科研人员努力解决的问题,提高材料质量、优化器件结构等是有效的手段。

此外,基于ZnMgO和氧化镓等材料的日盲紫外探测器件也是人们研究的重点,尽管它们的发展较晚、工艺相对不成熟,但其材料性能上的优势使得其在紫外探测领域有着广阔的发展前景。

电力电子器件

以碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)为代表的宽禁带半导体电力电子器件因其工作电压高、工作速度快、工作效率高,成为新一代半导体电力电子器件领域的宠儿,受到追捧。宽禁带半导体电力电子器件,被誉为带动新能源革命的绿色能源器件。SiC单极型器件一直是电力电子器件研发的主流,研发对象主要集中于肖特基势垒二极管(SBD)、结型场效应晶体管(JFET)和金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)等,其中SBD型和JFET型器件已经商品化,而MOS型器件因栅氧化层品质问题发展缓慢。

对制造电力电子器件而言,GaN具有很多优势,其材料优选因子普遍比SiC材料高,有望进一步提高电力电子器件性能,特别是将工作频率提高至微波领域,具有很大的潜力和应用前景。GaN微波功率器件主要是指AlGaIn/GaN异质结高电子迁移率晶体管,因为在AlGaIn/GaN异质结中因极化效应很容易在界面附近形成二维电子气(2DEG)。此外,用GaN也可制作SBD和MOS等电力电子器件。

三氧化二镓(Ga_2O_3)作为新一代功率半导体材料,其巴利加优值(3 444)远大于SiC(340)和GaN(870),因此具有更高的击穿电场强度,有望以低成本制造出高耐压且低损耗的功率电子器件。此外,研究表明,ZnO/ZnMgO界面也可以形成高迁移率2DEG,也适用于制作高性能的薄膜场效应晶体管。

从近几年宽禁带半导体领域SCI论文统计数据来看(见表1),我国无论是在发文数量上还是在文章被引用次数上都处于世界第一的位置,且大幅领先于其他国家/地区。2009—2014年,中国在该领域的论文数量增长迅速,从1 641篇增长至2 245篇,增长幅度达36.8%;同期美国论文数量从937篇下降至848篇,与中国差距逐年增大。但是,考虑到发达国家第3代半导体材料产业的飞速发展,特别是日本蓝宝石衬底、美国碳化硅衬底长期垄断国际GaN基LED照明核心技术的局面,我国在SCI论文统计数据上的优势也会黯然失色。尽管我国在硅衬底上蓝光LED关键技术、ZnO基材料掺杂和光电器件等方面获得了一些处于国际领先水平的突破,但整体上依然处于文章数量领先而核心技术相对落后的尴尬境地。因此,如何缩小与发达国家在GaN、SiC基材料与器件领域中成熟技术上的差距,率先抢占ZnO、 Ga_2O_3 等新材料的核心技术阵地是当前摆在我国从事宽禁带半导体材料的科研人员面前的首要任务。

发达国家第3代半导体材料产业的发展已经在国家的引领下正式进入了快车道。我国学者在第3代半导体方面的研究一直注重紧跟发达国家,科研积累良好,工程技术和国际先进水平差距不大,已经发展到了从跟踪模仿到并驾齐驱,进而有可能在部分领域获得领先的阶段。

在宽禁带半导体光电器件领域,我国在GaN基蓝光/紫外LED芯片的研发上起步较晚,但发展速度较快,取得了一系列进展。自2008年开始,相应专利以每年近百件的速度增加。南昌大学以江风益教授为代表的团队,攻克了硅上蓝光LED的关键技术。该系列技术成果荣获国家技术发明一等奖,打破了日本蓝宝石衬底、美国碳化硅衬底长期垄断国际LED照明核心技术的局面,有望



创造巨大的经济效益。最近,青岛杰生电气有限公司已开始商业供应深紫外LED产品,成为国内唯一生产深紫外LED的厂家。2015年,以西安电子科技大学、中国科学院半导体研究所、三安光电股份有限公司、青岛杰生电气有限公司和西安中为光电科技有限公司为完成单位的“氮化镓基紫外与深紫外LED关键技术”荣获国家科技进步奖二等奖。尽管我国在GaN基短波LED领域取得令人瞩目的进展,但整体水平与美日等发达国家还有一定差距,而在GaN基蓝光/紫外激光领域的差距则更为明显。ZnO作为制备紫外发光和激光器件的另一热门材料,引起了国内外科研人员的广泛关注,并在2000年前后掀起了研究热潮。在该领域,我国起步较早,无论是在发表文章数量和被引用次数上,还是在重要技术的突破上,都与国际先进水平保持同步,甚至在某些方面处于领先水平。

在宽禁带半导体电力电子器件领域,目前我国在碳化硅、氮化镓电力电子器件的材料、器件及模块等方面取得了长足进步。比如,在SiC晶圆制备上,中国科学院物理研究所于2013年实现了15.24 cm SiC晶圆的技术突破;2014年北京天科合达半导体股份有限公司已形成7万片产能的生产线,打破了国外对该技术的垄断。但在高端器件的开发和产业化方面与国际领先企业相比还有较大差距——新能源用核心电力电子器件仍依赖进口,特别是高端芯片,这一现状直接制约了国内一些新能源高端产品的发展。

宽禁带半导体材料在光显示、光存储、光探测等光电子器件和高温、高频大功率电力电子器件领域有广阔的应用前景。

光电子器件

(1) 发光和激光二极管

GaN基LED器件具有高效节能、长寿命、宽光谱、智能化等特点,是继白炽灯、荧光灯之后照明光源的又一次革命,无荧光粉白光LED将是其重要发展方向。而氮化物半导体激光器二极管在高密度信息存储、激光显示、水下以及塑料光纤通信、生物医学等民用和军用领域都有重要而广泛的应用,是光电子产业的龙头产品。

ZnO材料具有高的激子束缚能(约60 MeV),是实现激子型低阈值、低成本紫外激光器的理想材料,为光电子集成电路的发展提供了有效途径,具有广阔的应用前景。

(2) 紫外探测器件

AlGaN材料是制备可见盲和日盲紫外探测器的理想材料,尤其是可用于制备日盲面阵紫外探测器件,在环境监测、火灾预警、紫外制导及预警、保密通讯、空间探测等领域有着重要而广泛的应用前景。

SiC、ZnMgO、Ga₂O₃等材料也是制备紫外光电探测器的优秀材料,尤其针对高温、强辐射、宇宙空间等特殊环境的应用。

电力电子器件

SiC基电力电子器件在高压、高温、高效率、高频率、抗辐射等应用领域具有极大的优势,可以极大地提高现有能源的转换效率。不仅能够在直流、交流输电,不间断电源,开关电源,工业控制等传统工业领域广泛应用,而且在太阳能、风能等新能源领域也具有广阔的应用前景。

更为重要的是,Ⅲ族氮化物半导体材料体系是发展高频、高温、高功率电子器件的优选材料。GaN基微波功率器件和电力电子器件在军事国防应用领域和民用商业应用领域均有广泛应用前景,其商业价值甚至高于其在照明领域的应用。此外,在功率器件方面,β-Ga₂O₃-MOSFET显示了非常优异的器件特性,将为新的高性能功率器件在高压和低压的应用上铺平道路。

总之,宽禁带半导体材料在大功率、高温、高频、抗辐射的电力电子器件领域,以及短波长光电子器件领域均有着重要的应用前景。国际上SiC和GaN基材料与器件发展成熟,产业化规模巨大,我国未来可在生产过程中从成本控制、工艺优化等角度加大研究,缩短与国际先进水平的差距。而氧化锌、氧化镓等氧化物宽禁带半导体材料因具有诸多优势特性,应用前景广阔,相关基础科学问题与核心技术难题一旦解决,必将引起宽禁带半导体研究和应用格局的巨大改变,我国应加大在该领域的投入,争取拥有更多具有自主知识产权的核心技术。



表1 宽禁带半导体物理领域TOP200国家/地区 (按2012-2014年SCI论文数量、引文数量排序)

国家/地区	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2009-2011	2012-2014	国家/地区	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2009-2011	2012-2014
世界	6640	6741	7251	7405	7828	8034	20632	23267	世界	111660	97382	81214	64247	45136	24043	290256	133426
中国	1641	1766	1926	1970	2195	2245	5333	6410	中国	28258	26009	23342	19305	13889	7420	77609	40614
美国	937	874	901	973	913	848	2712	2734	美国	23469	19579	14642	12138	7776	3122	57690	23036
韩国	774	785	879	947	876	874	2438	2697	韩国	13382	11316	9385	7731	4918	2617	34083	15266
印度	438	518	593	601	755	884	1549	2240	印度	6875	7312	6724	5402	4532	2978	20911	12912
日本	636	625	545	584	539	611	1806	1734	德国	9766	8215	6561	4370	3551	1735	24542	9656
中国台湾	386	439	464	474	560	483	1289	1517	日本	9696	7618	5508	3776	2727	1742	22822	8245
德国	453	448	502	408	451	424	1403	1283	中国台湾	6186	5865	4282	3673	2537	1129	16333	7339
法国	315	307	297	278	307	311	919	896	英国	4942	3556	3137	2830	2146	950	11635	5926
俄罗斯	294	264	227	264	279	289	785	832	法国	5544	4662	2895	2343	1547	873	13101	4763
英国	266	206	269	235	236	228	741	699	澳大利亚	2774	2458	2035	1507	1304	660	7267	3471
伊朗	60	88	144	138	175	160	292	473	沙特阿拉伯	628	448	1328	1343	1130	570	2404	3043
意大利	157	161	182	163	145	150	500	458	新加坡	3039	2971	2247	2052	630	294	8257	2976
波兰	134	111	141	116	136	163	386	415	意大利	2620	2321	1772	1600	752	421	6713	2773
澳大利亚	129	118	110	132	144	135	357	411	中国香港	2121	1532	1024	1179	883	597	4677	2659
土耳其	68	54	72	133	128	142	194	403	马来西亚	309	725	1041	962	1139	505	2075	2606
马来西亚	28	58	83	90	165	147	169	402	伊朗	1111	1140	1656	1026	967	451	3907	2444
沙特阿拉伯	33	37	70	96	135	149	140	380	俄罗斯	2462	1746	1454	985	869	484	5662	2338
瑞典	108	95	105	105	117	133	308	355	土耳其	1207	1018	874	1091	741	427	3099	2259
西班牙	126	137	117	96	127	104	380	327	瑞典	2182	1766	956	757	729	428	4904	1914
中国香港	96	82	91	98	113	114	269	325	西班牙	2078	1741	1286	645	804	255	5105	1704